

N85-22645

77755

501
T135

H49
V30 #1
1082

화학공학

HWAHAK KONGHAK

JOURNAL OF ENGINEERING

Vol. 20, No. 1, February 1982

總 說

분체의 입도분석 기술의 최근동향

강 석 호

報 文

〈基礎研究〉

Carbontetrachloride-Cyclohexane-Benzene系 및 Ethanol n-Propanol-n-Heptane 系の 混合熱

林 鎮 男 · 郭 鉄 15

기-액 흡수계에서 Spiral wires-Radial plates 충전물의 진동효과

L A Wenzel · 김 우 식 25

화분배양 및 포도당 유기배양에 의한 최적 에타놀 발효

박 성 훈 · 최 차 용 37

혈관근육세포내에서의 Na⁺ 과 K⁺ 이온의 이동 현상에 대한 동역학적 해석

이 원 홍 49

〈工程設計 및 開發〉

원환 (Annular) 형 유동층내에서의 황철광으로부터 황 및 산화철 회수

강 용 · 유 영 태 · 김 상 돈 61

化学工学 教育

SI단위와 그 사용방법

71

화학공학 학위 취득자 명단

7

제 210 권

제 1 호

발행처 20(1) 1982
ISSN 0304-289X

한국화학공학회

분체의 입도분석기술의 최근동향

강 석 호

영남대학교 공과대학 화학공학과

Recent trends in the Particle Size Analysing Techniques

Suk-Ho Kang

Department of Chemical Engineering,
Yeungnam University, Gyongsan 632, Korea

요 약

분체의 입도분석기술이 최근 10년 전에 비교해 볼 때, 다른 과학 분야와 마찬가지로 대단한 발전을 가져왔습니다.

분석기술이 발달한 이유는 유체자원인 석유, 천연가스의 고갈, 또는 산유국 독점으로 새로운 에너지 대체개발의 필요성이 대두됨으로서 지난 반세기동안 개발에 등한해 왔던 석탄 고체자원의 개발에 새로운 관심을 쏟고 있습니다.

ABSTRACT

Recent advances and developments in the particle-sizing technologies were briefly reviewed in accordance with three operating principles including particle size and shape descriptions. Significant trends of the particle size analysing equipments recently developed show that compact electronic circuitry and rapid data-processing system were mainly adopted in the instrument designs. Some newly developed techniques characterizing the particulate system were also introduced.

1. 서 론

최근 분체의 입도 분석기술은, 10년 전"에 비하여, 다른 과학분야의 발전과 마찬가지로 대단한 발전을 이룩하였다.

분석기술이 발달한 이유는 첫째 유체자원인 석유, 천연가스의 고갈, 또는 산유국독점으로 인한

새로운 대체에너지의 개발의 필요성이 대두됨으로써 지난 반세기동안 개발에 등한하였던 석탄 등 고체자원의 개발에 새로운 관심이 쏠렸기 때문이다.

또 다른 이유는 전자공학기술의 발달로 인하여 모든 분석장치의 성능이 보다 정밀해졌고, 측정데이터의 처리가 신속하게 되어서 그에 따른 새로운 분석기술의 개발이 필요하게 된 것이다.

분체와 관련된 모든 자연현상은 구성입자의 크기, 즉 입도와 그 분포에 의하여 결정된다. 분체의 입도 및 그 분포는 광석의 처리, 각종 분말 제품의 질, 요업제품의 물성, 페인트의 내구성 등에 중요한 영향을 미치는 물론이고 분체 자체의 물성, 즉 겉보기밀도, 헨탁액의 레올로지, 건조분체의 흐름성, 화학반응성, 용해도, 자성, 투명도에도 결정적 역할을 한다. 이외에도 분체입도가 에너지문제, 환경오염문제, 자연자원의 활용 등의 분야에까지 다른 말로하면, 우주에서 토양에까지 직접 혹은 간접으로 깊은 관계가 있음은 분명하다.

그런데 분체입도측정기술은 실제로 그 기술이 쓰이는 정도에 비해서는 매우 소홀히 다루어지고 있다고 생각된다. 그래서 이 총설에서는 화학공학에 응용될 수 있는 범위내에서 최근 10년간의 연구동향과 기술현황을 일괄하겠다. 분석장치의 카달로그나 특정분야의 기술상황에 관계되는 최근의 논문이나 또는 총설에서 더 상세한 내용을 찾아볼 수 있을 것이다.^{2~8)}

입도분포를 측정할 때는 우선 다음과 같은 질문을 제기할 필요가 있다. 즉 (1) 무엇을 측정할 것인가? 단일 입자의 크기인가? 단일 입자의 형상인가? 평균 입도인가? (2) 그것을 어떤 방법으로 측정할 것인가? (3) 왜 측정하는가? 즉 측정결과를 어디에 이용하려고 하는가? (4) 측정을 어디서(실험실에서, 공정에서) 행해야 하는가? 등이다. 특히 지난 10년간에는 공정제어에 응용될 신속측정-온라인측정-기술의 개발이 현저하다.^{9~15)}

이러한 네가지 질문에 대답함으로써 측정방법, 기기, 예상되는 결과나 알고 싶은 결과 및 효율을 미리 예측할 수가 있고 적은 경비와 인력으로써 원하는 목적을 달성할 수가 있다.

이러한 문제를 서술하는 방법은 여러 가지가 있겠지만 이 총설에서는 5개 부문에 나누어 입자의 형상 및 입도분포에 대하여 먼저 거론하고 제수적 방법, 유체역학적 방법, 광학적 방법, 끝으로 몇가지 새로운 특수한 분석방법의 원리와 기술현황을 소개하고자 한다.

2. 단일입자의 형상과 입도 및 분말의 입도 분포

구형이나 육면체와 같은 규칙적 형상을 가진 입자의 형상을 표시하는 방법은 많으나 최근의 관심은 표면의凹凸이 심한 불규칙입자의 형상을 어떻게 수치로 표시할 수 있는가에 쏠려 있다. 입자형상을 수치로 표시하려는 기도는 네가지 측면으로 구별되겠는데, (1) 단일입자의 특성을 평가하는 방법, (2) 수학적 기법으로 형상을 표시하는 방법, (3) 입자특성을 서술적 방법으로 표시하는 경우¹⁶⁾ 그리고, (4) 분말고체의 벌크특성을 측정하는 방법 등이 있다(Table 1) 그러나 입자의 형상만을 입자크기와 구분하여 별개로 다룰수는 없으므로 형상과 크기는 함께¹⁷⁾ 다루어지게 되며, 입자의 형상과 입도를 표시할 수 있는 방법은 다음과 같이 넓게 3가지로 구분될 수 있다. 즉

(1) 구 상당입도

입자를 어떤 기준 파라미터에 비교하여 구형 입자에 상당한다고 생각하는 경우이다. 이때 입자의 크기 즉 입도는 구형입자에 상당하는 직경으로 정의된다. 여기서 기준파라미터는 부피, 겉넓이, 또는 Stokes'직경을 결정하는 침강속도 등 어느 파라미터나 기준이 될 수 있다.

침강속도를 파라미터로 하는 경우에는 같은 Stokes'직경을 가지는 입자이더라도 입자 Reynolds 수가 클때와 작을 때에 따라서 직경이 작게 또는 크게 측정되므로 주의를 요한다.¹⁸⁾

(2) 통계적 평균입도

입의의 방향으로 흩어져 있는 분체시료를 광학현미경 또는 전자현미경으로 관찰할 때 얻어지는 二次영상의 폐곡선내에서 일정방향의 선분의 길이를 측정하고 그 값의 통계적 평균치로써 입도를 표시하는 방법이다. 오래전부터 잘 알려진 표시법에는 Martin입도; Feret입도 등이 있는데, 그외에도 제수작업에 소요되는 측정시간이나 통계처리를 단축수행하는 장치들이 개만

Table 1. Shape parameters related with particle size descriptions

particle size	shape parameter	description
x_a, x_β	$\psi_{a,\beta} = \frac{x_a}{x_\beta}$	equivalent size
x_v, x_s	$\psi_{v,s}^2 = \frac{x_v^2}{x_s^2}$	equal vol } sphe- equal surf. } ricity
x_{pm}	$\psi_{p,m} = 1$	mean proj. circle
v_{st}	—	Stokes velocity
$v_{sf}(Re)$	—	settling rate at a given Re
x_{st}^2	$\psi_{st,v}^2 = \frac{x_{st}^2}{x_v^2} = \psi_{v,s}^2$	$\psi_{st,v} = \sqrt{\psi_{v,s}}$
$v_{sf}(Re < 10^3)$	$\psi_{sf(Re < 10^3),v} = \psi_{v,s}^2$	$\frac{x_{st}^3}{x_{pm}^3} = \psi_{v,s}^2 \cdot x_v$
$\frac{v_{sf}^2(Re < 10^3)}{x_{st}^2}$	$= \psi_{v,s}^3$	$\psi_{sf(Re > 10^3),st} = \psi_{v,s}^{3/2}$

되어 있다.

(3) 벡터 표시법

공간내에 존재하는 3次元 입자의 표면을 여러개의 기본요소로 나누어서 어느 임의의 原點으로부터 각 요소를 연결하는 위치벡터를 측정하여 입자의 형상과 입도를 결정하려는 시도가 있다.¹⁹⁾ 이 방법은 아직 구체적으로 이용되고 있지 않으나, 분체입자의 특성을, 특히 형상을 수학적 기법으로 표시하려는 새로운 연구들과^{19~23)} 함께 상당한 관심을 끌고 있다.

입자의 형상은 입도측정에도 중요하지만 입자의 운동에도 큰 영향^{24~25)} 미치는 것은 4절에서 언급될 것이다.

서론에서 언급한바와 같이 분체는 크기가 다른 단일입자의 집합체로서 동일 물질이더라도 그 입도분포는 그 제조과정에 따라서 달라지게 되며, 또 동일한 시료분체의 평균 입자크기를 표시하는데는 여러가지의 방법이 있게 된다. 즉 입자 크기별로 측정되는 분체입자의 개수($r=0$), 길이($r=1$), 면적($r=2$), 부피 또는 질량($r=3$)에 따라서 입도분포곡선이 달라지게 되고 그 결과로 결정되는 평균입도의 값도 달라진다(Fig. 1 a,b).

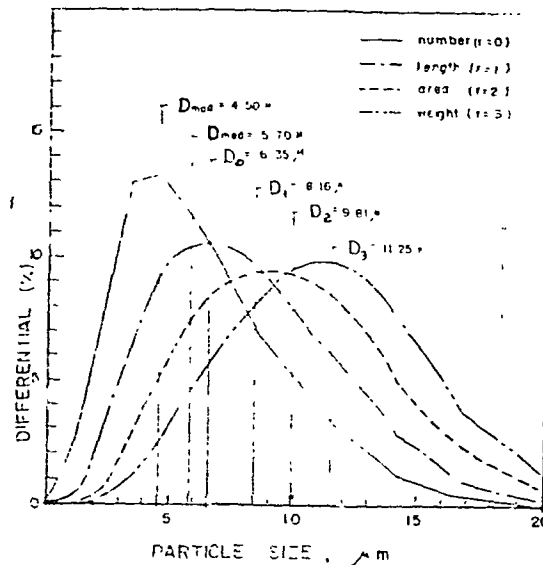


Fig. 1-a. Various descriptions of a mean particle size for a given sample powder

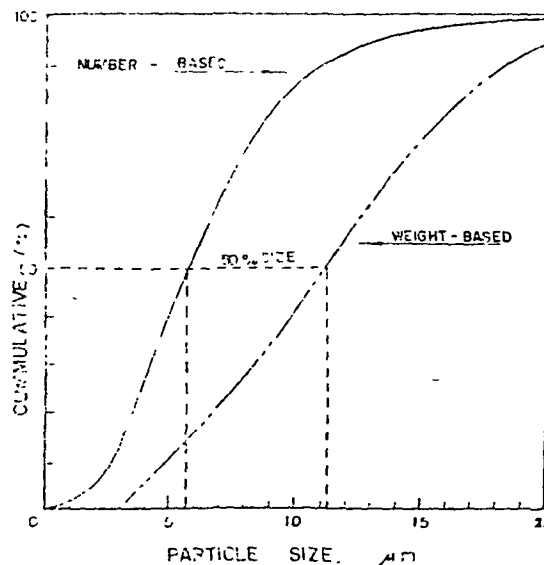


Fig. 1-b. Difference between various particle size descriptions.

분체의 종류에 따라서 약간의 차이는 있겠지만, 일반적으로 개수기준분포곡선은 대수정규분포나 Rosin-Rammler 분포선에서 직선으로 표시된다.^{26~29)}

이론적으로는 어떤 차원을(예 : 질량) 기준으로 삼은 입도분포곡선을 얻으면 다른 차원(예 : 개수)기준의 입도분포곡선으로 환산할 수 있는 근거는 마련되어 있다.³⁰⁾ 즉, $r=0, 1, 2$, 또는 3인 도수분포함수 $n_r(x) = \frac{dN_r(x)}{dx}$ 의 k 차 모멘트를 ($k=0, 1, 2, 3$) 다음과 같이 정의하면,

$$M_{k,r} = \int_{\min}^{\max} x^k n_r(x) dx \quad (1)$$

일반적으로

$$M_{k,r} = M_{k,r-\epsilon,0} \frac{M_{\epsilon,0}}{M_{r,0}} \quad (2)$$

로부터 임의의 분포함수 모멘트를 구할 수 있고 그 평균입도를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\bar{x}_{k,r} = k/M_{k,r} \quad (3)$$

식 (3)에서 $k=1, r=0$ 이면 산술평균입도가 얻어지고 $k=2, r=0$ 이면 기하평균입도, $k=3, r=0$ 이면, 부피 또는 질량평균입도를 구할 수 있다. 또 $k=3, r=2$ 이면 Sauter 평균입도라고도 부르는 면적-부피의 비에 상당하는 입도를 구할 수가 있다. Sauter 입도는 충전탑내의 충전물(촉매, 흡착제)의 평균입도를 나타내는데 주로 쓰인다.

이와같은 모멘트의 계산에 의하여 분체의 비표면적을 개수분포곡선으로부터 이론적으로 구할 수 있음은 물론이다. 이러한 이론식은 모두 구형입자를 가정한 경우에 성립하는 식인데, 비구형입자의 경우에는 형상계수로 보정해야 함은 물론이다.

입도분포 및 평균입도를 계산하는 이론의 발전은 정밀하고 신속한 측정과 측정 data의 신속한 처리가 가능한 분석장치의 개발을 촉진시킨 셈이다.

3. 계수측정방법(Counting methods)

이 방법은 분체입자 자체의 크기를 단일입자마다 직접 측정하는 방법과 입자의 영상을 해상하는 간접적 방법으로 대별된다.³¹⁾ 어느 경우에도 측정요소내에 단일입자가 들어와야 하거나 적어도 한알씩 들어올 때, 그 크기를 측정하고 측정된 입자의 수를 헤아리게 된다.

입자의 영상의 크기를 측정하는 간접적 방법

은^{32~33)} 간단한 광학현미경을 이용하여 100 배 정도 확대된 사진에 의존하는 방법과 10⁵ 정도로 확대된 전자현미경사진을 이용하는 방법이 포함된다. 입자의 영상해석은 二次元的이지마는 오래전부터 사용된 분석방법이다. 영상해석의 수단을 사진대신에 TV 화면으로 교체하고 microcomputer의 도움으로 counting과 sizing을 수행하는 Quantimet³⁴⁾는 이 방법에 의한 대표적 분석장치라고 할 수 있다.

그 외에도 photoscanner,³⁵⁾ Spectrophotometer의³⁶⁾ 개발이 활발하다. 이들 장치(Table 2)는 입자의 영상해석에 필요한 시간, 인력의 절약에

Table 2. Manufacturers of Particle Image Analyser

Name	Manufacturer
TGZ 3	Zeiss
Quantimet	Imanco
Classimat	
TAS-System	Leitz
Mikro-Videomat	Carl Zeiss
Epiquant	VEB Carl Zeiss
Magiscan	Joyce Loebel Ltd
MOP	Kontron
Omnicon	Bausch & Lomb
Imagelyzer	Hamatsu

큰 공헌을 하고 있지만 영상을 얻을 수 있는 시료를 채취하고, 적당한 분산제를 사용하여 각 입자가 겹치지 않도록 분산시키고, 가능한 한 입자의 모양과 동일한 영상을 얻을 수 있도록, 상당한 주의가 시료준비과정에 필요하다.^{37~41)}

이러한 시료준비과정은 측정결과의 신뢰성에, 즉 시료가 모집단을 대표할 수 있는가를 판단하는데, 결정적인 역할을 한다.

계수측정법의 다른 한 가지는 입자 자체가 측정요소에 직접 노출되는 직접측정법이다. 원칙적으로 측정순간에 단일 입자가 분산매체속에 실려서 측정요소에 보내져야 하지만 측정된 입자가 낱알씩 계속 공급되어야 한다. 측정요소에는 전자장 또는 전자파가 부하되고 이속에 노출되는 입자의 수와 크기가 전자장의 세기를 변화시켜서 그 세기의 변화를 감지기로서 측정하여 전기적 신호로 전환하고 신호의 진폭과 진동수에 의하여

입자의 크기와 수를 결정하게 된다. 이때의 계산은 이론적으로 가능한 경우도 있고, 입도가 알려진 시료를 이용한 검정실험을 통하여 장치특성을 미리 결정해야하는 경우도 있다.

입자의 크기와 분포를 측정하는데 사용되는 전자장의 변화량은 세가지로 구분할 수 있다. 첫째, 전장의 세기가 입자의 존재로 인하여 변하는 Coulter Counter의 원리, 둘째, 전자파의 세기가 변화하는 광학적원리, 그리고 유체학적 힘의 세기가 영향을 받는 경우이다. 후자의 두 가지는 다음절에서 별도로 상세하게 논의하기로 하겠다. 그리고 여기에서는 Coulter counter의 원리와 그 발전에 대하여 언급하겠다.^{43~45)}

쿨터계수기는 Fig. 2와 같이 전관을 지리한 벽의 한 부분에 뚫린 측정구멍을 통하여 입자가 통과할 때, 측정구멍에 작용하고 있던 전류의 세기 또는 저항의 변화량을 측정하여 입도를 결정하는 장치이다. 측정된 시료분말은 전기전도성 액체 속에 엉김이 없이 간 분산되어서 한쪽에서 다른 쪽으로 한알씩 이동되어야 한다. 측정구멍 구멍내에 한개의 입자가 들어오면 일정하던 저항 R_0 가 달라지게 된다. 저항의 변화 ΔR 은 입자부피 v 에 비례하므로 $\Delta R/R_0 = v/V$ 의 관계가 성립한다.

이 방법으로 $n_0(x)$ 와 x^3 을 얻으면 입도분포의 모멘트식으로부터 $n_3(x)$ 와 x 를 환산해서 구할 수가 있다.³⁰⁾ 입자가 분산되어 있는 전해질 용액은 수은을 채운 마이크로 피펫트의 압력에 의해서 측정구멍을 통과하여 이동하게 된다. 측정구멍의 크기에 비하여 입자크기는 매우 작기때문에 장치의 noise 문제는 심각하지 않으나, 구멍

이 막히면 계속 측정이 불가능하기 때문에 이런 현상에 대비한 조치를 취할 수 있는 장치제작도 중요하지만 일반적으로는 입자의 크기가 구멍크기의 2~30%를 유지하도록 되어 있다.

입도분포가 넓은 경우에는 측정구멍의 크기가 다른 여러개의 전해질 용기를 교환하여 넓은 범위의 입도를 측정할 수 있도록 고안된 장치도 개발되어 있다.

4. 유체역학적 원리에 의한 방법

이 방법은 2가지로 구분해서 설명하면 편리 하겠다. 즉, 액상에 분산되어 있는 분체의 침강 속도론 측정하여 hydrodynamic particle size를 결정하는 경우와, 기상에 분산되어 있는 분체의 이동속도를 측정하여 aerodynamic particle size를 결정하는 경우이다

기체 혹은 액체에 현탁되어 있는 분체 입자에 작용하는 힘들은 Table 3과 같이 구분할 수 있다. 이 표에 함께 표시할 수 없지만, 입도 분석에 중요한 영향을 미치는 인자들은 입자의 형상 입자의 배치, 장치의 벽과 입자사이에 관계되는 벽 효과, 그리고 입자의 농도가 높을때 생기는 간섭효과도 있다.⁴⁶⁾

표에 나열된 각 힘들은 기상이나 액상의 분체 분산계에 공통으로 적용되는 것들이지만, 계가 놓여 있는 field, 분산된 입자의 입도와 그 분포에 따라서 입도분석에 중요한 영향을 미치는 것도 있고 제외될 수 있는 것도 있음은 물론이다.

중력장내에서 액체속에 현탁된 분체입자의 크기는 침강속도 h/t 를 측정하고 Stokes 방정식⁴⁷⁾을 이용하면 계산할 수 있다.

이 식은 $Re < 0.2$ 일때만 잘 맞는다.

$$x = \sqrt{\frac{18\mu}{(\rho_s - \rho)g} \cdot \frac{h}{t}} \quad (4)$$

따라서 정지된 유체(대개는 물)에서 $Re < 0.2$ 가 되자면 $x < 75\mu m$ 인데, 침강법으로 측정되는 분체입자는 200 mesh 체로 체질한 통기분에 대하여 믿을만한 결과를 주게 된다. $Re > 0.2$ 이던 측정된 결과는 $Re < 0.2$ 일때보다 작은 수치를 가진다.

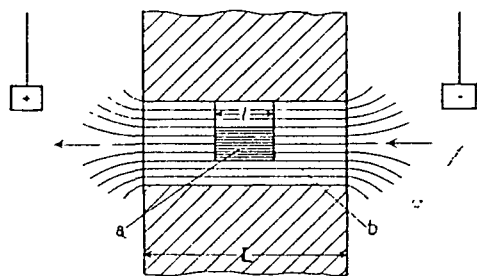


Fig. 2. Principle of the Coulter Counter

Table 3. Various forces acting on a particle in the measuring system

Forces	more classified	related equation	ref
flow	drag	$F_D = C_D(Re) \frac{\pi \lambda^2}{8} \rho_s v^2$	(47)
	buoyant	$F_B = \frac{\pi \lambda^3}{6} \frac{\rho_f}{\rho_s} (g \text{ or } r\omega^2)$	
field	gravity	$F_G = \frac{\pi \lambda^3}{6} \rho_s g$	(48)
	centrifugal	$F_C = \frac{\pi \lambda^3}{6} \rho_s r\omega^2$	
	magnetic	$M \propto H$	(49)
	electrical	$F_E = Enc$	
inertial	—	$F_i = \frac{\pi \lambda^3}{6} \rho_s \frac{dv}{dt}$	(47)
interparticle	impact	target eff. $\propto \frac{V_s v^2 \rho_s}{18 \mu_t}$	(50)
	friction	—	
	adhesion	van der Waals electrostatic capillary	
diffusional effect	thermophoretic	$P = -tD \frac{dc}{dy}$	(52)
	photophoretic	$P = -tD \frac{dc}{dy}$	(52)
	Brownian	$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - \frac{v}{t} \frac{\partial c}{\partial y}$	(51)
	concentration	$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - \frac{v}{t} \frac{\partial c}{\partial y}$	(51)

이 방법으로 측정될 수 있는 가장 작은 입도는 $\rho_s = 2 \text{ g/cm}^3$ 의 경우, $< 1 \mu\text{m}$ 이다. $5 \mu\text{m}$ 정도만 되어도 정밀한 측정이 어렵게 된다. 침강법에서 주의할 사항은 현탁액 중에 분체농도 $< 0.1\%$, 온도조절 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 유지되어야 하며 특히 단일입자가 액속에서 잘 분산되도록, 필요한 경우에는, 분산제를 사용해야 한다.⁵³⁾ 농도의 영향은 $C_v < 10^{-3}$ (즉 0.1%)에서는 실제침강속도가 단일입자의 침강속도보다 훨씬 커진다. 측정된 침강속도로부터 hydramdynamic particle diameter와 그 분포를 계산하는 실험 data의 처리에 관한 사항은 생략하기로 하고 흔히 사용되는 장치들을 간단히 소개하겠다. 그런데 보편화되어 있는 진동식 측정기기에 대한 설명(예: 안드레아선피켓)은 일반 서적을 참고하기 바란다.

상용화되어 있는 침강저울은 Bostock(영국), Shimadzu(일본), Satorius(독일) 등이다. 이들은 digital reading이 가능하고 microprocessor

를 부착하여 data processing도 가능하다. 침전된 입자를 제거할 수 있도록 된 시험관형 침전장치로는 I.C.I(영국), B.C.U.R.A(불) 등이 있고 strontium 90에서 나오는 β -선을 이용한 장치도 있다. 이들 장치는 모두 분체의 누적입도 분포곡선을 얻는 장치들이다.^{54~57)}

누적분포곡선은 쉽게 빈도분포곡선으로 전환될 수 있는데, 빈도 분포곡선을 얻는 측정방법으로는 피펫법, 밀도측정법, 광침강법(Lambert-Beer 법칙을 이용한 현탁액의 농도측정)이 있다.

중력침강법으로는 측정시간이 길기때문에 이러한 단점을 보완하려는, 즉 측정시간을 단축하려는 개발연구가 많다. —그 중에서 1966년에 발표된 Muta⁵⁸⁾와 Kalshoven⁵⁹⁾의 연구는 광전침강법에 사용되는 측정셀의 수직 위치를 측정기간 동안에 연속적으로 상향조정함으로써 측정에 소요되는 시간을 단축하는 원리이다.

분체입자가 상당히 작아지면 침전속도가 저하하여 또다시 측정시간이 더욱 길어지므로 이런 단점을 보완하는 다른 수단으로써 원심력을 이용하여 침상속도를 증가시킬 수 있다.⁶⁰⁾

이 방법은 중식침강처럼 깔고루 분산된 현탁액을 사용하는 경우도 있지만 원심력이 작용하고 있는 분산매질의 상층부에 측정시료를 투입하는 소위 two-layer 법도 흔히 쓰인다.^{53, 61)} 이때에 적용되는 계산식은 다음과 같다.

$$x^2 = \frac{18\mu \ln \frac{R}{R_0}}{(\rho_s - \rho)\omega^2 t} \quad (5)$$

원심력을 이용한 액상침강분석장치는 시료량이 매우 작고 장치도 매우 정교하게 된다. 그러나 기상에 분산된 미세입자 또는 에어로졸의 분석을 위하여 많은 기상원심침강분석장치가 개발되고 있다.^{62, 63)} 특히 대기오염문제가 심각하게 되고부터는 이분야에서의 측정장치의 개발이 매우 활발하다.

기상에 분산된 공업분체의 입도분석은 침강법보다 공기중 침강속도에 맞먹는 속도의 기체를 난대방향(elutriation)^{64, 65)} 또는 수직방향(crossflow)^{66, 67, 68)}으로 공급하여 분리되는 입자의량을 계산함으로써 입도와 그 분포를 결정한다.

그러나 1회의 실험에서 분도곡선의 1점을 얻는 방법이므로 시간과 경비가 많이 든다. 따라서 분체의 입도분석에 사용되는 장치는 Bahco-Spiral Classifier 나 Analysette 9 정도뿐이며, 이 분야의 분석기술개발은 많지 않다. (그대신에 기상에 분산된 분체의 입도측정은 다음장에서 설명한 광학적 원리에 많이 의존한다).

여기에서 잠간 분체의 분급효율을 설명하겠다.

높은 분급효율로 분체를 분급하려는 실제생산 공정에서는 공기에 분산된 분체의 운동이 매우 중요하다.

Fig. 3-a. 와 같이 입도가 x_u 와 x_0 사이에 분포되어 있는 분체를 $x_c = x_{50}$ 으로 분급하는 경우의 분리효율은 Fig. 3-b 와 같이 표시된다. x_c 보다 큰것과 작은 것으로 완전히 분리될 수 없으므로 x_c 보다 큰 것 $g \cdot n_c(x)$ 속에는 작은것들이 섞여있고 x_c 보다 작은 입자들만 모여야 할

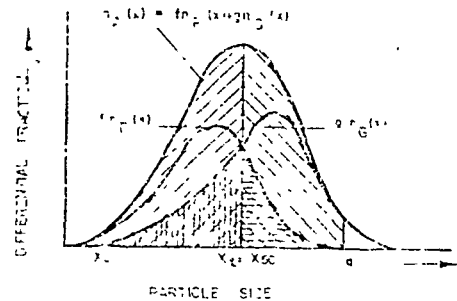


Fig. 3-a Actual separation of the fine and the coarse fraction out of the feed through the cut size, x_c .

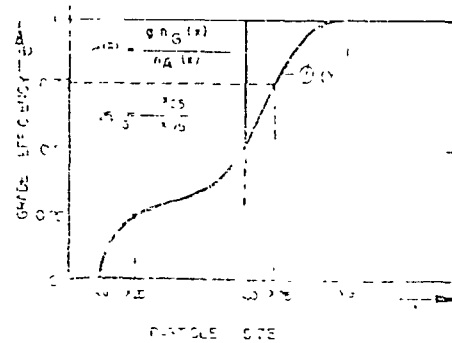


Fig. 3-b. Separation curve showing the grade efficiency, $\phi(x)$, and a separation function, $K'_{25/75}$.

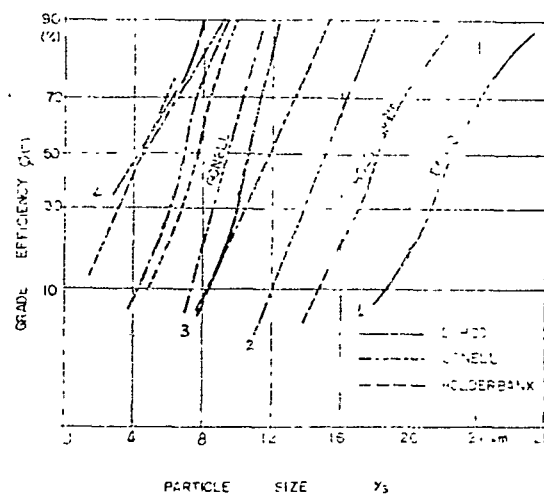


Fig. 3-c. Various grade efficiencies can be obtained with different PSA instruments for the samples; 1, 2, 3 and 4

부분 $f \cdot n_F(x)$ 에는 큰것도 들어간다. 분리효율을 $\phi(x)$ 로 정의하면, 완전분리가 일어날 때는 $\phi(x)$ 가 계단함수꼴이 되고, 즉 수직선으로 표시되고, 그렇지 못할수록 분리곡선 $\phi(x)$ 가 완만하게 된다. 분리효율을 나타내는 다른 방법의 하나는 x_{25} 와 x_{75} 또는 x_{10} 과 x_{90} 에 해당하는 $K = x_{25}/x_{75}$ 또는 x_{10}/x_{90} 의 크기로써 분리효율이 좋고 나쁨을 판단할 수 있게 된다. Fig. 3-c은 3가지 공기식분급장치의 분리효율을 입도분포가 다른 4가지시료에 대하여 비교한 것이다. 분리곡선이 수직에 가까울수록 분리효율이 높음을 나타낸다. 이러한 분리효율(곡선)은 입도분석장치의 선정에 있어서도 중요하지만 입도분리 작업을 포함하는 분체취급공정에 조업관리 기법으로도 사용될 수 있다.

유체역학의 원리를 이용하여 분체의 평균 입도나 비표면적을 동시에 결정할 수 있는 방법에는 유체투과법이 있다.¹¹ 미세한 고체분말이 충전되어 있는 고정층의 작은 모세관을 투과하는 액체(물) 또는 기체(공기)의 저항을 측정하여 비표면적과 평균입도를 결정하는 방법이다. 이것은 분체층의 모세관 유로의 크기가 입자의 크기에 관계되는 사실에 근거한 방법이다.

5. 광학적원리의 이용

건자파는 물체-입자에 투사되면 방해를 받는다. 이러한 방해효과는 광의 흡수, 투과, 산란 현상인데 이것을 분체의 입도분석에 사용하게 된다.⁶⁹⁻⁷¹ 광의 산란효과는 미세입자에 도달한 광파가 굴절, 반사 및 회절에 의하여 그광의 진행 방향이 바뀌는 현상이다.

위의 방해효과들이 강약의 차이는 있으나 동시에 일어나기 때문에 어느 효과를 이용하여 측정할것인가는 광학적 설비의 배치에 의해서 결정된다. 따라서 얻어지는 결과도 분체의 평균입도일 때도 있고 입도분포일 때도 있다

광학적 원리가 이용된 분석장치가 최근에 큰 발전을 하고 있는 이유는 첫째 광원으로써 매우 안정된 단색의 레이저광을 쉽게 발생시킬 수가 있으며, 둘째, 측정 data의 처리에 전자계산기를

쉽게 이용할 수 있고, 셋째, "분석할 시료의 채취" 및 전처리과정을 생략하고 분체가 존재하는 상태 그대로 측정할 수 있는 이점이 있기 때문이다. 세번째, 이유는 특히 대기오염분진의 측정에 광학적 방법이 큰 기여를 하게되는 이유이다.

이러한 이유들은 광학적 원리를 이용한 장치를 사용하면 분석에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있고 분체취급공정의 자동화도 가능하기 때문에 연구활동이나 기업활동의 측면에서 함께 큰 관심을 모으고 있다.

Table 4는 시판되는 광학적 장치에 관한 종합자료이다. 수집된 자료 이외에도 수많은 장치들이 있음은 물론이다. 그러나 이 표에서는 중요한 원리에 해당하는 몇가지 기준을 구분하여 독자의 이해를 돕고자 마련한 것이다.

Table 4 Commercial Instruments classified after major working principles

principle	name of instrument	ref
scattering	Optical particle counter	(72)
	Tipton particle analyser	(73)
	Coulter Nanosizer	(74, 75)
	Royco Particle Analyser	(76)
	Laser Interferometers	(77, 78)
	Laser Doppler Anemometers	(79-83)
diffraction	Talbot-Disa	(84)
	CILAS granulometer	(85, 86)
	Malvern Analyser	(87, 88)
	Microtrac	(89-93)
extinction	HIAC-counter	(94)

Mie의 광산란이론은 분체의 입도분석에 기본이 된다.^{95, 96, 97} 그러나 이 이론을 실제로 응용하는 데는 여러가지 어려움이 뒤따른다. 즉 시료 분체의 굴절률, 그리고 입도와 산란특성 사이의 수학적 관계를 미리 예측할 수 있어야 하고, 특히 사방으로 산란되는 산란광의 세기를 여러가지 각도($0^\circ \sim 180^\circ$)에서 측정하는 실험적 어려움이 있다. 그럼에도 불구하고 laser 광이 개발되어 있고, 컴퓨터가 복잡한 계산을 대신해 줌으로써 이 원리를 이용한 분석장치의 개발은 많

이 진전되었다. 70년대에 특히 이 분야의 발전에 기초가 되는 이론적 연구들이 많이 행하여졌다.^{98,99,100)} 시료입자의 입도가 단일입도(monodispersed)인 경우에는 이론치와 실측치가 비교적 접근하지만, 시료의 입도가 넓게 분포되어 있으면(polydispersed) 입도의 근사한 평균치만을 얻게 된다.

광산란 현상자체가 매우 복잡한 현상이기 때문에 이 원리를 이용한 장치는 그 종류가 매우 다양하고 측정원리도 실제로는 약간씩 다르다.

1973년에 미국 NBS⁷²⁾에서 EPA를 위하여 개발한 optical particle counter는 산란광의 세기를 두 점의 좁은 범위의 산란각에서($5 \sim 10^\circ$) 동시에 측정할 수 있도록 된 것이다. 두 점에서 측정된 산란광의 세기의 비는 입자크기와 관계가 있다. 또 이 비는 대기분진의 성분과도 관계가 있을지도 모른다는 가정하에 계속 연구되고 있다고 한다. Coulter Nanosizer^{74,75)}는 광산란 이론을 직접 이용한 장치가 아니고 산란광의 변동(fluctuation)을 측정하여 입자의 브라운운동에 관한 Einstein의 이론¹⁰¹⁾으로부터 입자크기를 계산하는 장치이다. Royco 제기회사는 대략 Fig. 4에 표시한 원리에 의하여 액체에 분산된 $0.5 \mu\text{m}$ 정도의 입자를 분석하는 장치를 개발하였다.⁷⁶⁾ 작은 광속(光速)의 레이저광의 일부는 반사거울을 통과하여 보정용 광섬유에 보내져서 산란광검출부에 단락된(chopped)광펄스로 계속 전달된다. 다른 일부의 광속은 시료 cell에서 분산된 후 산란광검출부에 전달되어 광섬유로부터 전달된 펄스와 함께 펄스높이가 비교분석되어 입도분포가 결정하게 된다.

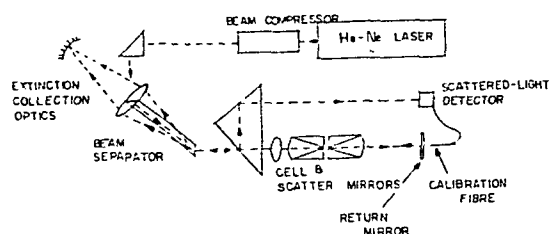


Fig. 4. Schematic diagram of the Royco submicron particle analyser

Laser doppler anemometer는 두개의 레이저광이 교차하는 측정요소를 통과하는 입자의 크기를 측정하는데 사용된다.^{79~83)}

그런데 이런 목적에는 입자가 분산되어 있는 유체의 유속을 미리 알아야 한다. 바꾸어 말하자면 LDA는 유속을 측정하는 장치로써 유속을 측정하려면 입도가 알려진 입자가 유체와 함께 검출부(측정요소)를 통과해야 한다. 검출부는 일종의 광학적 체(optical sieve)라고 할 수 있겠는데 입자의 크기는 검출부의 imaginary fringe pattern과 비교됨으로써 결정된다.

Fraunhofer 회절 또는 far-field 회절¹⁰²⁾을 이용하면 구형입자의 크기에 반비례하는 동심원의 Airy 회절무늬를 얻을 수 있기 때문에 이 원리를 이용한 장치의 발전도 매우 활발하다. 단일입도가 아닌 구형분체의 경우에는 회절무늬의 동심원의 지름이 불규칙하게 분포되기 때문에 주어진 시료의 입도분포를 측정하는데는 회절하는 mask-disc⁸⁵⁾가 필요하고 회절무늬의 광에너지세기를 단일 입도별 회절무늬의 세기로 분리하는 복잡한 matrix 계산이 필요하게 된다.^{88,103)}

회절원리에 의한 분석기술에서 아직도 미해결인 부분은 분체입자의 형상이 비구형인 경우인데, 이론적 연구와 실험적 시도가 계속되고 있다.¹⁰⁰⁾

프라운호퍼 회절원리를 이용한 최초의 입도분석장치는 광산개내의 분진을 측정하기 위한 Talbot의 장치인 것 같다.⁸⁴⁾

광학적 방법의 다른 한 가지는 광투과법인데,^{104,105)} 농도가 알려진 분체분산체에 투사된 광선 I_0 중에서 투과된 광선 I 를 측정하여 분체

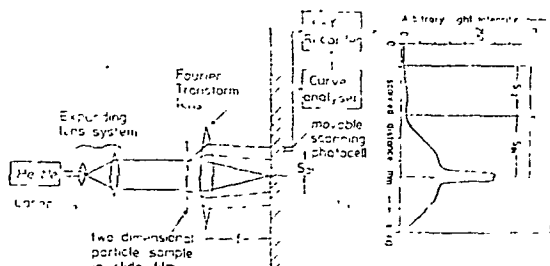


Fig. 5 Far-field diffraction analysis of the 2-dimensional model particles

의 평균 입도를 결정하는 방법이다. 투사광선에 노출되는 시료의 두께는 단일입자가 존재할 정도로 얇아야 하고, 특히 입도의 크기와 분체의 특성에 의하여 변하는 광투과계수(Extinction coefficient, K)를 검정실험을 통하여 미리 알아야 한다.

투과법에 사용되는 광세기의 관계식은 다음과 같이 주어진다.

$$I/I_0 = 1 - A_{ex} \quad C_A = 1 - C_K \quad K(x) \frac{\pi x^2}{4} \quad (5)$$

여기서 A_{ex} 는 광투과면적, C_A 는 개수로 표시한 입자의 농도이다.

이 식은 광침강법에 의한 분체의 비표면적 결정에도 쓰인다.

6. 특수한 몇가지 방법의 소개와 결론

앞에서 논의한 방법들은 측정기술의 응용을 염두에 두고 분류된 것이다. 입자를 측정하는데 쓰이는 물리학적 원리를 기준으로 측정법을 분류한다면 Table 5와 같이 구분할 수도 있다.¹⁵⁾ 이 표에 나열된 여러 원리들에서 앞에서 언급되지 않았지만 최근의 새로운 몇가지 측정기술을 소개하면서 이 글을 끝내겠다.

Table 5. physical principles employed to sense and size particles

1. Image replication
2. Electrical resistance change
3. Light scattering
4. Radiation attenuation,
light, ultrasonic, β -ray, x-ray
5. Classification;
sieve, elutriation, hydrocyclone, sedimentation
6. Fluid flow,
permeametry, nozzles, rheology
7. Hot wire anemometry
8. Electrostatic ion capture

체(sieve)는 분체의 입도분석에 가장 많이 쓰이는 장치이다. 그런데, 분체공학에서 가장 보편적으로 사용되는 체분석방법이 대단히 소홀하

게 취급되는 경우가 매우 흔하다. 이 논문에서는 그 소홀함을 다시 강조하려는 것이 아니고 연속조작이 가능한 자동분석체설비를 소개하려고 한다.^{106, 107)}

이 장치는 수동식 체질의 시료준비 과정을 제외한 모든 작업을 자동화한 것으로 Schonert와 Orr의 장치가 있다.

다른 하나의 새로운 시도는 음향을¹⁰⁸⁾ 이용한 입도분석이다. 옛날에는 분쇄장치의 운전소음을 듣고 분쇄입자의 크기를 점치는 유능한 기술자가 있었다고 한다. 剛體의 입자가 서로 충돌할 때 생기는 음향신호로 입자의 크기나 형상을 결정할 수 있을 것이라는 생각에서 연구가 최근에 진행되고 있다.^{109, 110)} 50 μ m 정도의 강철구나 큰 라스비드의 실험을 통하여, 충돌음향의 평균주파수의 역수와 입도는 직선관계가 있음이 밝혀져서 이를 기초로 하여 음향파를 입도분석에 이용할 가능성이 크다.

또 Coulter Counter를 발명한 Small은¹¹¹⁾ 크로마토그래피원리를 응용한 hydrodynamic chromatography 현상을 발견하여 입도가 0.23과 0.11 μ m인 latex를 분리해 낼 수 있었다.

광섬유를 이용한 분체의 입도및 농도측정을 위한 연구도 진행되고 있는데 그 성과는 좀 기다려볼 만하다.¹¹²⁾

결론적으로 말하면 입도분석기술 개발의 경향은 오래된 원리를 이용한 장치의 성능을 개선하는 연구와, 새로운 아이디어에 의한 분석기술의 개발로 구분할 수 있겠다.

서론에서도 언급한바와 같이, 분체공학의 각 분야가 경험적 과학이라는 종래의 생각때문에 큰 발전을 이룩하지 못했으나 학문적 영역의 중첩이 심화되고 있는 현재에는 이 분야의 이론적 연구의 필요성이 결실하고 또 그렇게 인식되고 있다.

따라서 분체공학의 핵심분야로서 분체의 입도분석이 중요함을 새삼 강조할 필요는 없겠다. 이것은 마치 화학공업에서 화학분석의 중요성과 같은 것이다.

분석기술의 발전없이 어떤 분야도 발전되지 못

하듯이 더 많은 과학자, 기술자들이 이 분야에 관심과 이해를 높이는데 이 글이 도움이 되기를 바란다.

Refereneces

1. 姜錫浩, 화학공학, 8(4), 178(1970).
2. Collins, E.A., Davidson, J.A., and Daniels, C.A. *J. Paint Technol.*, 47, 35(1975).
3. Jimbo, G., *J. Soc. Powder Tech. Jap.*, 17 (6), 307/13(1980).
4. Leschonski, K., *Proc. Jahrestagung der Ges. f. Aerosolforschung*, Karlsruhe, (11./14. Okt. 1977).
5. Leschonski, K., W. Alex, B. Koglin, *Chem.-Ing.-Techn.*, 45(1), 23/6 (1974).
6. Orr, C. Jr., "Particle Size Analysis," ed. by M. J. Groves, Hyden, 1978 p.77~100
7. Scarlett, B., *Europ. Symp. Particle Tech* 1980(Amsterdam.), p 1180/99
8. Swift, D.J.P., J.R. Schuble, R.W. Sheldon, *J. Sed. Petrol.*, 42 (1), 122/34 (1972).
9. Bay, T., H. J. Kortright, E. C. Muly, *presented at ISA-75*, Milwaukee, Wisc., Oct. 1975.
10. Davies, R., *Am. Lab.* (Dec)17/23(1973).
Am. Lab. (Jan)73/86(1974).
Am. Lab. (Feb)47/55(1974).
11. Davies, R., H.E. Turner, "Particle Size Analysis," ed. M.J. Groves, Heyden, 1978 p. 238/49
12. Inoue, T., *J. Soc. Powder Tech. Jap.*, 17 (6), 313/19(1980)
13. Leschonski, K., *Chem.-Ing.-Techn.*, 50(3) 194/203 (1978).
14. Miyanami, K., *J. Soc. Powder Tech. Jap.*, 17(6), 319/24(1980).
15. Stanley-Wood, N.G., *Control & Instrum.*, 42/17 (Dec. 1974).
16. Tsubaki, J., G. Jimbo, *Powder Tech.*, 22, 171/8 (1979).
17. Rumpf, H., *Powder Tech.*, 18,3/17(1977)
18. Scarlett, B., *Proceedings of 4th Intern. Congress for Stereology* (1975).
19. Beddow, J. K., G. Philip, *Planseeber.*, 23, 1, (1975).
20. Davies, R., *Powder Tech.*, 12, 111/24, (1975).
21. Fong, S.-T., J. K. Beddow, A. F. Vetter, *Powder Tech.*, 22, 17/21(1979).
22. Gotoh, K., *Powder Tech.*, 23, 131/4 (1979).
23. Meloy, T. P., *Powder Tech.*, 16, 233/253 (1977).
24. Chong, Y. S., D. A. Ratkowsky, N. Epstein, *Powder Tech.*, 23, 35/66 (1979).
25. Hodgkinson, J. R., *Amer. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 26(1), 64/71 (1965).
26. Boross, L., *Staub-Reinhalt. d. Luft*, 40 (2), 76/80(1980).
27. Falivene, P. J., *Chem. Eng.*, 38(4), 87/9 (1981).
28. Smirnow, S., *Aufbereitungs-Techn.*, 13(6), 308/14(1975).
29. Smirnow, S., *Aufbereitungs-Techn.*, 21(4), 191/7(1980).
30. Leschonski, K., TH Karlsruhe, 1963
31. Alex, W., *Aufbereitungs-Techn.*, 13(2), 105/11(1972).
13(3), 168/82(1972).
13(10), 639/52(1972)
13(11), 723/32(1972)
32. Buessem, W. R., Tarhay, L., White, E. W., *Dechema Monographien*, 79B, Verlag Chemie, Weinheim, 1976., p. 223.
33. Davidson, J. A. and Haller, H. S. *J. Colloid Interface Sci.*, 47, 459 (1974).
34. Fisher, C., *Microscope*, 19(1), 1/20(1971)
35. Johnston, J. E., and L. J. Rosen, *Powder Tech.*, 14, 195/291(1976).
36. Grum, F., D. J. Paine, and J. L. Simonds, *J. Opt. Soc. Am.*, 61(1), 70/75(1971).
37. Bernotat, S., J. Raasch, and H. Rumpf, *Aufbereitungs-Techn.*, 18(9), 455/7 (1977).
38. Eder, Th., *Aufbereitungs-Techn.*, 2(12), 484/95(1961).
2(11), 443/6 (1961).
2(4), 136/18 (1961).
2(3), 104/9 (1961).
39. Leschonski, K., *Chem.-Ing.-Techn.*, 45(1),

- 8/18 (1973).
40. Gy, P. M., *Intern. J. Mineral Processing* 3. (289/312(1976).
 41. Herrmann, H., *Chem.-Ing.-Tech.* 51(11), 1140/1, (1979).
 42. Alliet, D. F., *Powder Tech.*, 13, 3/7(1976)
 43. Barnett, M. I., *Powder Tech.*, 14, 125 (1976).
 44. Cooper, W. D., and G. D. Parfitt, *Kolloid Z. u. Z. f. Polymere*, 223(2), 160/6(1968).
 45. Laapas, H., and K. Heiskanen, "Particle Size Analysis," ed. by M. J. Groves, Heyden, 1978, p. 218/26.
 46. Koghn B., *Chem.-Ing.-Tech.*, 44. (8), 515 (1972).
 47. McCabe W., L., and J. C. Smith, "Unit Operations of Chemical Engineering," McGraw-Hill, New York, 1976, p. 141.
 48. Beddow J., K. *Chem. Eng.*, 88 (17), 70 (1981)
 49. Megaw W. J., et al, *J. Sci. Instr.*, 2, 1013(1969).
 50. Zebel G., et al, *Staub-Reinh. d. Luft*, 35 (8), 289 (1975).
 51. Loughborough Univ. of Technology, "Particle Workshop-Particle Size Analysis," Loughborough, England, 1979.
 52. Whitmore P. J., *J. Aerosol. Sci.*, 12, 1 (1981).
 53. Parfitt, G. D., *Powder Tech.*, 17, 157 (1977).
 54. Brezina, J., *J. Sedim. Petrol.*, 39, 1627/31 (1969).
 55. Groves, M. J., and H. S. Yalabik, *Powder Tech.*, 17, 213 (1977).
 56. Leschonski, K., and S. R. de Silva, *Lehrstuhl f. MVT der TU Clausthal* 1976,
 57. Schlee, J., *J. Sedim. Petrol.*, 36, 403 (1966).
 58. Muta, A., Saite, N., and Uehara, Y., *Proc. Particle Size Analysis Conf.*, 1966
 59. Kalshoven J., *Proc. Particle Analysis Conf.*, 1966.
 60. Muschelknautz, E., *Partikelmessstechnik*, 79B, Verlag Chemie, Weinheim, 1976, p. 267.
 61. Kamack, H., *J. Anal. Chem.*, 23, 844(1961)
 62. Marple, V. A., and Rufow, K. L., *J. Aerorol Sci.*, 7(5), 425 (1976).
 63. Raabe, O. G., *J. Air Pollution Control Assn.*, 26, 856 (1976).
 64. Lange, K., *Aufbereitungs-Technik*, 21(1) 15(1980).
 65. Molerus, O., and H. Hoffmann, *Chem.-Ing.-Tech.*, 41 (5 + 6), (1969).
 66. Leschonski, K., *Chem.-Ing.-Tech.*, 43(6), 317(1971).
 67. Leschonski, K., and S. de Silva, *Chem.-Ing.-Tech.*, 50(7), 556(1978).
 68. Metzger, K. L., and K. Leschonski, *Dechema Monographien*, 79B, 13, (1975).
 69. Hewitt, G. F. and Whalley, P. B., *Int. J. Multiphase Flow*, 6(1-2), 139 (1980).
 70. Harrison, R. E., and E. Hyman, *Appl. Opt.*, 18 (6), 823(1979).
 71. Wortman, D. E., *US NTIS Rep.*, AD-A 070, 965, (1979).
 72. Gravatt, C., *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 23, 12(1979).
 73. Tipton, D. F., *Powder Tech.*, 14, 245(1976).
 74. Gahwiller, C., *Powder Tech.*, 25, 11(1980).
 75. Clark, N. A., J. H. Lunacek, and G.B. Benedek, *Am. J. Phys.*, 38, 575(1970).
 76. Lieberman, A., *Proc. 7th. Annual Fine Particle Soc. Conf.*, Aug. 1975.
 77. Bachalo, W. D., *Appl. Opt.*, 19, 363(1979)
 78. Farmer, W. M., *Appl. Opt.*, 11, 2603 (1972).
 79. Durst, F., and M. Zaré, *Sonderforschungsbereich 80*, Rep. SFB 80/E/65, Universität Karlsruhe(1975).
 80. Hong, N. S., and A. R. Jones, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 9, 1839(1976).
 81. McComb, W. D., and S. M. Salih, *J. Aerosol Sci.*, 9, 299 (1978).
 82. Wigley, G., *J. Phys. E. Sci. Instrument*, 11, 629(1978).
 83. Wilson, J. C., and B. Y. H. Liu, *J. Aerosol Sci.*, 11, 139(1980).

84. Talbot, J. H., *J. Mine Ventil. Soc. of South Africa*, 20(2), 21(1967).
85. Cornillaut, J., *Appl. Opt.*, 11, 265(1972).
86. Meric, J. P., *Dechema Monographien*, Bd. 79A, 1549 (1975).
87. Felton, P. G., and D. J. Brown, *Paper presented at the 6th. Annual Ind. Chem. & Research Meeting*, U. C. London, Apr. 1979.
88. Swithenbank, J., J. M. Beer, D. S. Taylor, D. Abbot, and O. C. McCreath, *Progress in Aeronautics and Astron.*, 53, 1 (1977).
89. Dobbins, R. A., L. Croco, and I. Glassman, *J. Am. Inst. Aeron. and Astron.*, 1, 1882(1963).
90. Muly, E. C., H. C. Frock, and D. L. Grammes, *IEEE, Trans. Ind. Application*, IA-15, 323(1979).
91. Parrent, G. B., B. J. Thomson, *Optica Acta*, 2(3), 183(1964).
92. Weiss, E. L., and H.N. Frock, *Powder Tech.*, 14, 287(1976).
93. Wertheimer, A. L., and L. Wilcock, *Appl. Opt.*, 15, 1616 (1976).
94. West, G. C., *Verfahrenstech. Export-J.*, (2), 8(1979).
95. Boron, S., and B. Waldie, *Appl. Opt.*, 17, 1644(1978).
96. Ross, W. D., *Appl. Opt.*, 11, 1919(1972).
97. Harris, F. S., *Appl. Opt.*, 11, 2697 (1972).
98. Latimer, P., *J. Colloid Interf. Sci.*, 53, 102 (1975).
99. Asano, S., and G. Yamamoto, *Appl. Opt.*, 14, 29(1975).
100. Naylor, A. G., C. D. Wright, "Particle Size Analysis," ed. by M.J. Groves, Heyden, 1978), p.110.
101. Whitmore, P. J., *J. Aerosol Sci.*, 12, 1(1981).
102. Goodman, J. W., "Introduction to Fourier Optics," McGraw-Hill, 1968, p.91.
103. Fymat, A. L., *Appl. Math. Comput.*, 1, 131 (1975).
104. Ruuskanen, J., *Staub-Reinh. d. Luft*, 40, 445(1980).
105. Spankuch, D., *Appl. Opt.*, 11, 2844(1972).
106. Mandrella, H., *Min. Mag.*, 142, 242 (1980).
107. Schonert, K., W. Schwenk, and K. Steier, *Aufbereitungs-Tech.*, 7, 368(1974).
108. Langer, G., *Powder Tech.*, 6, 5(1972).
109. Leach, M. F., G. A. Rubin, and J. C. Williams, *Powder Tech.*, 16, 153(1977).
110. Ong, K. H., and M. S. Beck, *Measurem. & Control*, 8, 453 (1975).
111. Smaall, H., *J. Colloid Interf. Sci.*, 48, 147(1974).
112. McSweeney, A., *Appl. Opt.*, 11, 210(1972).